

# Research on the Synergistic Optimization of Electrical Safety Control and Technical Management in Hydropower Station

Guangshou Zhang

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Mengzi, Yunnan, 661100, China

## Abstract

This study addresses the critical need for effective coordination between electrical safety management and technical operations in hydropower stations, which is essential for stable operation and operational efficiency. To resolve the disconnect between these two management systems that hinders overall performance improvement, we explore a collaborative optimization framework. The research first systematically analyzes existing electrical safety protocols and technical management models in hydropower stations, identifying gaps to clarify the need for synergy. A theoretical framework prioritizing risk prevention and efficiency enhancement is then developed, supported by key technical solutions and collaborative mechanisms. The proposed approach was implemented in a real-world hydropower station case study. Comparative analysis of key performance indicators before and after optimization demonstrated significant improvements in electrical safety, equipment reliability, and management efficiency. These results provide actionable insights for achieving deep integration of safety and technical management in hydropower operations.

## Keywords

hydropower station; electrical safety; technical management; collaborative optimization; risk management

# 水电站电气安全管控与技术管理协同优化实践研究

张光寿

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南蒙自 661100

## 摘要

本文结合水电站电气安全管控与技术管理高效协同这一保障电站稳定运行与提升效益的关键要点, 针对当前两类管理体系存在脱节问题制约整体效能进一步提升的状况, 本研究旨在探索电气安全管控与技术管理的协同优化路径并通过实践验证其有效性, 先是系统分析水电站现行电气安全管控体系与技术管理模式的现状及存在问题以明确协同优化的内在需求, 进而构建以风险预防和效率提升为核心目标的协同优化理论框架并设计相应的关键技术与协同工作机制, 将该协同优化方案应用于某实际水电站案例进行实践检验, 通过对优化前后关键指标的比较分析评估应用效果, 实践结果表明该方案有效降低电气事故风险、提高设备运行可靠性与管理效率, 显著提升水电站综合管理水平, 研究成果为水电站实现安全与技术深度融合提供可行的实践参考。

## 关键词

水电站; 电气安全; 技术管理; 协同优化; 风险管理

## 1 引言

作为国家关键基础设施的水电站, 其安全稳定运行对能源供应和经济社会发展有重要影响, 其中电气安全管控作为水电站安全运行的基石, 涉及高压设备、继电保护、接地系统等诸多环节, 以防止人身触电、设备损坏及电网事故为核心目标。而技术管理聚焦于设备状态监测、维护策略更新、技术改造与人员专业技能提升, 作为保障电站长期高效运行的技术支撑。在当前行业实践中, 电气安全管控体系与技术管理体系往往相对独立运行, 存在信息共享不畅、管理标准

不一、资源调配冲突等问题, 这种条块分割的管理模式致使安全隐患识别滞后、运维效率低下、整体效能难以提升。随着智能水电站和数字化转型的推进, 传统分散化管理模式已难以适应新形势下对安全性与经济性提出的更高要求, 实现电气安全管控与技术管理的深度协同与优化, 打破管理壁垒, 形成统一、高效、预防性的综合管理机制, 成为水电站现代化管理演进的内在需求和必然趋势。

## 2 水电站电气安全与技术管理现状分析

### 2.1 电气安全管控体系现状

水电站电气安全管控体系的核心架构建立在以刚性规章制度和周期性计划检修为基础的防御性管理模式上, 其运行机制高度依赖《电业安全工作规程》及电站内部细化的“两

【作者简介】张光寿(1983-), 男, 彝族, 中国云南石屏人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其自动化技术研究。

票三制”等规范性文件，旨在通过严格的流程控制隔绝风险。在组织架构上，通常设立独立的安全监察部门，垂直管理并监督运行和维护部门的安全规程执行情况，形成厂、部、班组三级安全责任网络<sup>[1]</sup>。现场管控的焦点集中于高压配电装置、主变压器、发电机出口等重要一次设备的操作安全与绝缘防护，以及继电保护、自动装置等二次系统的正确动作可靠性。安全绩效的衡量往往局限于“事故率”、“违章次数”等滞后性指标，如表1所示的关键指标统计虽能反映结果，却难以主动揭示过程管理的薄弱环节，导致安全管理在一定程度上与设备实际运行状态和技术演进趋势脱节。

表1 某水电站年度电气安全关键指标统计表

指标名称	统计周期	数值	备注
人身触电事故次数	年度	0起	主要考核指标
重大设备事故次数	年度	1起	因雷击导致主变套管击穿
一般电气障碍次数	年度	5起	包括保护误动、绝缘降低等
工作票合格率	年度	99.2%	反映规程执行规范性
保护装置正确动作率	年度	99.8%	反映二次系统可靠性
设备定期巡检完成率	月度平均	98.5%	反映日常维护到位情况
安全隐患整改完成率	年度	95.0%	反映问题闭环管理效率

## 2.2 技术管理实施现状

水电站技术管理体系的职能重心在于保障设备资产的长期技术性能与生命周期价值，其工作范畴覆盖了从设备选型、安装调试、运行维护到报废更新的全过程。在设备管理层面，技术管理致力于制定和优化检修策略，正逐步从传统的以时间为基准的定期检修向以设备实际状态为依据的状态检修过渡，例如通过在线监测系统持续采集主变压器的油色谱数据、振动数据以及高压断路器的动作特性参数，为检修决策提供数据支持。在技术升级方面，管理活动聚焦于针对现有设备存在的技术瓶颈或落后态势实施改造，如将电磁型保护继电器更换为具有故障录波和网络通信功能的微机保护装置，或对厂用电系统进行自动化改造以提升供电可靠性。

## 2.3 现存问题与协同需求

水电站现行管理体制下，电气安全管控与技术管理两套体系在并行运作中暴露出的结构性矛盾，已成为制约电站整体运营效能提升的瓶颈，凸显出深度协同的迫切必要性。最根本的问题源于二者在管理逻辑与目标维度上的差异所形成的信息壁垒与流程割裂。安全管控体系遵循“风险规避”原则，强调过程的合规性与结果的可控性，其产生的数据多为事件报告、违章记录、安全考核等定性或结果性信息。而技术管理体系则遵循“效能优化”原则，关注设备的状态参数、性能衰减趋势、技术改造方案等定量与过程性数据。这两类数据目前由不同职能部门掌握，缺乏统一的数据标准与共享平台，形成了坚固的“信息孤岛”。

## 3 协同优化理论与方法构建

### 3.1 协同优化理论框架

水电站电气安全管控与技术管理的协同优化理论框架，本质上是构建一个以“数据驱动、风险前瞻、动态决策”为核心的智能化智能管理生态系统。该框架的哲学基础是摒弃将安全与技术视为两个独立管理维度的传统观念，而是将其重新定义为同一运营目标下的两个相互依存、相互影响的内在属性<sup>[2]</sup>。其理论内核是一个动态的风险-效能均衡模型，该模型不再将安全目标简单定义为“零事故”，而是追求在可接受的综合风险阈值下实现全站资产生命周期效用的最大化。

### 3.2 关键优化技术

支撑该理论框架落地的关键优化技术，聚焦于解决从海量异构数据中提取智能、并进行前瞻性决策的核心挑战。第一项核心技术是基于机器学习的动态风险智能诊断与预测技术。该技术的具体实现依赖于对数据湖中的多源时序数据进行特征工程处理，例如提取设备振动信号的时频域特征、油色谱数据的产气速率特征、以及历史缺陷记录中的共现模式特征。随后，采用如随机森林、梯度提升决策树等集成学习算法，或适用于时序数据的长短期记忆网络模型，训练一个能够关联设备多维状态与故障概率的预测模型。

### 3.3 协同机制设计

为确保协同优化技术能够真正嵌入组织肌体并有效运行，必须设计一套与之紧密耦合的协同工作机制，实现从技术赋能到管理变革的跨越。机制设计的首要任务是建立跨职能的协同决策组织与流程<sup>[3]</sup>。这包括成立一个常设的“运营协同决策小组”，成员由安全监察、技术管理、运行维护等部门的负责人和核心专家组成，该小组依托协同优化平台提供的动态风险视图和帕累托最优方案集，定期（如每周）召开决策会议，其核心议程不是简单的任务分配，而是基于数据驱动的洞察进行战略权衡，例如共同审议未来一周的作业计划，决定是优先处理一个风险较高但耗时较长的隐患消除项目，还是优先完成多个风险中等但能快速提升设备效能的技改措施。

## 4 实践应用与效果评估

### 4.1 案例水电站概况

本次协同优化实践选取我国西南地区某中型径流式水电站作为试点对象，该电站总装机容量为120兆瓦，装设三台单机容量40兆瓦的立轴混流式水轮发电机组，以110千伏电压等级接入区域电网，承担基荷供电与调峰任务。电站电气主接线采用典型的发电机-变压器单元接线形式，每台发电机出口经断路器接至一台升压变压器，三台主变高压侧并联于110千伏单母线，通过两回出线接入系统。厂用电系统由两台互为备用的厂用变压器供电，配备柴油发电机作为保安电源。在实施协同优化前，该电站的管理模式呈现出明

显的职能分割特征,安全生产部负责执行严格的安全规程与监督,侧重于工作票许可、现场安全措施落实与事故调查。而技术设备部则专注于主辅设备的定期预防性试验、检修计划编排、技术改造方案制定与实施。例如,技术部门规划的主变压器油色谱在线监测系统改造项目,与安全生产部为应对迎峰度夏而密集安排的配电设备隐患排查专项行动在时间与人力资源上产生重叠,导致现场工作力量分散、协调成本增高。

## 4.2 协同优化实施过程

协同优化方案在该水电站的实施是一个系统性工程,遵循分阶段、渐进式的原则,核心任务是将理论框架与关键技术嵌入实际的组织结构与工作流程中。实施的第一步是基础建设与数据整合阶段,历时约两个月,重点任务包括部署协同优化管理信息平台,该平台作为数据中枢与协同载体,通过开发标准数据接口,成功接入了原有的计算机监控系统、生产管理信息系统(含两票管理)、设备状态在线监测系统(涵盖变压器、发电机、断路器等主设备)以及安全巡检移动应用数据库,对异构数据进行清洗、转换与集成,初步构建了电站级的统一数据仓库,为后续分析奠定了基石。第二步进入模型构建与试点应用阶段,历时约三个月,技术团队基于整合后的历史数据,利用机器学习算法训练了关键设备(如主变压器、110千伏GIS)的动态风险评估模型,并初步开发了兼顾安全约束与技术要求的检修任务优化排序模块<sup>[4]</sup>。在此阶段,选择了一个110千伏线路间隔的预防性试验及保护定检作业作为试点,首次应用协同决策流程,平台模型综合评估了该线路的实时负荷、近期故障录波数据、此次作业的复杂程度与历史类似作业的安全记录,生成了风险评级为中风险的建议方案,并自动提示需增派一名经验丰富的检修人员作为现场监护。该方案由新成立的运营协同决策小组审议通过后执行,实现了从经验驱动到数据驱动的决策模式转变。

## 4.3 效果评估分析

为科学评估协同优化实践的应用成效,对案例水电站实施协同优化前后一个完整年度的关键运营指标进行了对比分析。评估聚焦于电气安全水平、技术管理效率及综合经济效益三个维度。在电气安全方面,最为显著的改善体现在风险控制的主观性和精准性上,统计期内未发生人身触电或

重大设备事故,但更具意义的是各类安全隐患的早期发现与干预比例大幅提升,因设备隐性缺陷导致的一般电气障碍事件由优化前的年均5次下降至2次,降幅达60%,这直接得益于动态风险评估模型对设备潜在故障的预警能力,使得维护团队能在故障萌芽阶段采取干预措施<sup>[5]</sup>。同时,工作票执行过程中的不规范项次减少约40%,反映出协同平台提供的标准化安全措施库与技术方案的风险提示功能,有效降低了人为失误风险。在技术管理效率方面,设备管理的计划性与资源利用效率得到优化,非计划停运小时数同比下降了25%,这源于优化调度算法平衡了预防性维护的及时性与发电效益的持续性。尽管总的维护工作量因更积极的预防性策略而略有增加,但得益于人力资源的优化配置,计划性检修项目的按时完成率提高了15%,平均检修工期缩短了约8%,显示出资源协同调度带来的显著效率增益。

## 5 结语

本文通过系统分析水电站电气安全管控与技术管理分离的现状弊端,本研究构建以数据驱动和风险预控为核心的协同优化理论框架、开发动态风险评估与多目标资源优化等关键技术并设计跨部门协同工作机制。经案例水电站实践应用表明,该协同模式有效破解信息孤岛难题、实现安全风险从被动应对向主动预警的根本转变,同时提升设备可靠性管理与运维资源调配的科学性,显著提高水电站综合运营效能与经济效益。研究成果为传统水电站管理模式向智能化、精益化转型提供具有可操作性的实践路径与理论支撑,对提升水电行业整体安全管理水平与运营效益具有重要实际参考价值。

## 参考文献

- [1] 赵守敏.积石峡水电站地震时继电保护动作特性分析[J].水电站机电技术,2025,48(09):42-44.
- [2] 郭茂林.基于多目标优化的水电站电气设备安全运行与维护[J].现代职业安全,2025,(04):41-44.
- [3] 张珊,刘梦丹,梁筱君.水电站机电安装工程的施工安全管理研究[J].电站系统工程,2024,40(06):85-86+88.
- [4] 闫雪峰,郑明浩,党涛,等.水电站门式启闭机电气控制系统升级改造技术的应用[J].云南水力发电,2024,40(05):142-145.
- [5] 林雪峰.水电站电气设备安装的安全技术分析[J].现代制造技术与装备,2023,59(11):144-146.